中国生态农业学报 2016 年 6 月 第 24 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2016, 24(6): 753−761

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151160

扁桃||冬小麦间作模式下树冠结构对间作区域光环境的影响*

张 雯[1] 谢 辉[1] 张 平[2] 钟海霞[1] 张付春[1] 庄红梅[1]
杨 磊[1] 徐叶挺[1] 龚 鹏[1] 卢春生[1]

(1. 新疆农业科学院园艺作物研究所 乌鲁木齐 830091; 2. 新疆农业科学院农产品贮藏加工所 乌鲁木齐 830091)

摘 要 本文研究了作物、果树间作模式下果树树冠结构对间作作物区域光环境的影响，为果粮间作模式下适宜果树高光效树形结构的确定提供理论依据。以南疆地区扁桃(10 a)||冬小麦间作种植模式为研究对象，扁桃树形分为疏散分层形、开心形、高干形、小冠半圆形 4 个树形处理，以非间作的冬小麦大田为对照，于冬小麦灌浆期对间作区域不同波段辐射强度、光谱组成和光合有效辐射(PAR)日变化规律进行分区测定。结果表明: 1)各树形对应间作区域光环境优劣程度从高至低依次为小冠半圆形、高干形、开心形、疏散分层形，几个树形处理间作区域总辐射强度平均值分别为对照的 55.63%、46.54%、37.87%和 28.76%，光合有效辐射强度依次为自然光对照的 55.84%、44.57%、35.52%和 26.40%; 2)与自然光对照相比，间作区域各波段光照辐射强度均有不同程度降低，其中 PAR、蓝紫光、黄绿光和红橙光区域消减幅度高于总辐射平均值，紫外、近红外和远红外区域消减幅度低于总辐射平均值。以疏散分层形西侧冠下区为例，该区域总辐射消减为自然光的 11.37%，蓝紫光、黄绿光、红橙光和光合有效辐射分别消减至对照的 7.98%、8.42%、8.62%和 8.30%; 紫外光、近红外和远红外分别消减至对照的 12.30%、15.94%和 23.00%; 3)光质参数中“红橙光/远红外”比值对树冠结构特征变化敏感度高，变异系数为 23.34%，可作为对间作区域光环境评价的主要指标; 4)冠幅、干高、树高、有无主干等树冠结构指标对间作区域特别是东侧区域的 PAR 日变化趋势影响大。综合以上结果，南疆扁桃||冬小麦间作模式下，控冠、提干、落头等整形修剪措施能够改善间作区域的光照条件，以采用小冠半圆形树形间作区域光环境最优。

关键词 扁桃||小麦间作 树冠结构 光谱 光合有效辐射 扁桃树 冬小麦
中图分类号: S662.9; S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)06-0753-09

Effect of tree canopy structure on light condition in almond-winter wheat intercropping systems*

ZHANG Wen[1], XIE Hui[1], ZHANG Ping[2], ZHONG Haixia[1], ZHANG Fuchun[1], ZHUANG Hongmei[1], YANG Lei[1], XU Yeting[1], GONG Peng[1], LU Chunsheng[1]

(1. Institute of Horticulture, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China; 2. Institute of Agricultural Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract Intercropping of fruit trees and cereals is one of the major cropping patterns in South Xinjiang. As trees age and canopy volumes increase in intercropping systems, low-light stress due to tree canopy effect becomes the main drive behind

* 国家自然科学基金地区基金项目(31560138)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2014211A040)和农业部公益性行业(农业)科研专项经费项目(201003043)资助
张雯，研究方向为农林复合种植和果园生态。E-mail: zwxilin@126.com
收稿日期: 2015−10−27 接受日期: 2016−01−26

* Funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 31560138), Xinjiang Uygur Autonomous Region Natural Science Funds (No. 2014211A040) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (No. 201003043)
Corresponding author, ZHANG Wen, E-mail: zwxilin@126.com
Received Oct. 27, 2015; accepted Jan. 26, 2016

dramatic reduction in yield. However, given the fragile ecological environment of South Xinjiang and food security, this system has continued for a long time now. In this study, the relationship between canopy structure and light condition in intercropping systems was determined in order to provide theoretical basis for choosing canopy structures suitable for optimal production. Almond tree (10 a) and winter wheat intercropping system was used to study the effects of 4 canopy structures (delayed open-central shape, open-center shape, high-stem shape and semicircle small-canopy shape) on radiation intensity of various wavebands, spectral composition and diurnal variations of photosynthetically active radiation (PAR) during wheat filling stage, with monoculture winter wheat as the control. The results showed that: 1) In terms of quality of light condition in intercropping systems, the order from high to low was semicircle small-canopy shape, high-stem shape, open-center shape and delayed open-central shape. The averages of radiation intensity under the 4 canopy shapes were respectively 55.63%, 46.54%, 37.87% and 28.76% of the control. Correspondingly, PAR intensities were 55.84%, 44.57%, 35.52% and 26.40% of the control. 2) Compared with the control, radiation intensity of each waveband decreased at various degrees. Reductions in PAR, blue-violet, yellow-green and red-orange light radiations were larger than average reduction in total radiation. However, reductions in ultraviolet, near infrared and far infrared light radiation were smaller than average reduction in total radiation. For example, in the eastern region under delayed open-central shape canopy, total radiation decreased to 11.37% of the control. Then blue-violet light, yellow-green light, red-orange light and PAR decreased respectively to 7.98%, 8.42%, 8.62% and 8.30% while ultraviolet light, near infrared light, far infrared light decreased to 12.30%, 15.94% and 23.00% of the control. 3) For all the light quality parameters, the ratio of red-orange light to far infrared light was most sensitive to canopy structure (CV = 23.34%). It can be used as a major indicator for light conditions in intercropping systems. 4) Canopy structure characteristics (e.g., canopy width, stem height, tree height and whether center stem) existed or had little effect on diurnal variation in PAR in intercropping systems, especially for regions east of the tree. Based on the above analysis, light conditions in intercropping systems can be improved by tree pruning such as canopy limitation, trunk height increase and head cut. Among the four canopy structures, semicircle small-canopy shape produced the best light conditions.

Keywords Almond/winter wheat intercropping; Tree canopy structure; Spectrum; PAR; Almond tree; Winter wheat

南疆地区光照充足，昼夜温差大，具有发展特色林果业得天独厚的地域和环境优势[1]，截至 2013 年南疆 5 地州(喀什、和田、克州、阿克苏、巴州)林果树栽培面积达到 100.2 万 hm^2(新疆维吾尔自治区林果办统计数据)。果粮间作复合种植模式是南疆地区农业生产的主要栽植模式之一。2013 年南疆小麦(*Triticum aestivum*)、棉花(*Gossypium hirsutum*)栽培面积 122.2 万 hm^2，其中约 85 万 hm^2 与果树间作种植[2]。随着树龄和树冠体积的不断增大，树冠遮荫造成的弱光胁迫成为造成间作小麦大幅减产的关键因素[3−5]，尤其是小麦灌浆期的弱光胁迫不利于光合产物的合成和分配，对产量和品质造成较大影响[6]。如何通过高光效树形的选择与构建，在保证果树优质丰产的基础上，减轻对间作作物的遮光胁迫，保证果粮间作模式持续健康发展，是目前南疆地区生产上急需解决的问题。郭佳欢等[7]、王清涛等[8]采用间作巷道 PAR 饱和时空窗的研究方法分别对新疆南疆地区枣树(*Zizyphus jujuba*)、杏树(*Armeniaca* sp.)||冬小麦间作种植模式进行了研究，研究结果表明与果树间作导致冬小麦 PAR 饱和时空窗损失严重，使小麦光能利用能力不能最终发挥，并最终导致小麦减产，其中 6 a 生枣树 3 m×4 m 株行距条件下，扬花期最小仅为 3.6 h; 7 a 生杏树 6 m×7 m 株行距条件下，冬小麦灌浆期 PAR 饱和时空窗最小。田阳等[9]通过晋西黄土地区 4 种典型的果农间作模式光竞争情况研究结果表明，间作作物相同的情况下苹果(*Malus pumila*)竞争强度大于核桃(*Juglans regia*)；关于叶幕层影响透射光质的研究表明，不同波长的辐射透过叶幕时消减速率不同，植物叶片对紫外辐射与光合有效辐射的吸收率为 0.8~0.9，而对近红外辐射的吸收率只有 0.1 左右[10]。自然光经过叶片的选择性吸收后 R/FR 值发生显著变化[11−12]。综上所述，果粮间作系统内，间作区域光环境与上层树冠结构截光密切相关，然而研究主要集中于树种、行距等因素对总辐射及 PAR 的影响方面，关于不同树形结构对间作区域光环境特别是光质组成影响的研究报道较少，因此本研究以南疆扁桃(*Amygdalus communis*)||冬小麦间作种植模式为试材，研究树形结构对不同间作区域光质组成改变、光合有效辐射强度的影响，以期为南疆地区扁桃||冬小麦间作模式下适宜果树树形的选择提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2014—2015 年在新疆喀什地区莎车县托吾木斯瑭乡扁桃丰产示范园内进行，供试果树

2005 年定植, 株行距 6 m×7 m, 南北行向。种植模式为扁桃||冬小麦间作种植, 无复播作物, 小麦沿树行种植, 间作小麦种植行宽度 6 m。扁桃设置疏散分层形、小冠形、高干形、开心形 4 个树形处理(具体树形结构指标见表 1), 每小区 5 株, 依行向连续种植(及其对应树行东西两侧 0.5~3.5 m 范围内小麦间作区域), 3 次重复, 4 个处理共设 12 个小区, 单个小区面积 168 m², 其中, 间作小麦面积 144 m², 具体分布如图 1 所示。以邻近区域大田种植为对照。其中疏散分层形和小冠形树形结构处理是通过多年培养获得, 高干形和开心形均是通过对疏散分层形的改造获得, 其中对疏散分层形进行提干改造, 逐步将下部主枝锯除, 通过 2~3 年改造建成高干形; 对疏散分层形进行落头改造, 逐步降低主干高度, 形成无主干形, 通过 2 年改造建成开心形。其他生产管理措施保持一致。

表 1　扁桃||小麦间作系统中 4 种扁桃树形处理的树体结构

Table 1　Crown structures of 4 treatments of almond tree forms in almond||wheat intercropping system

处理 Treatment	树形 Tree form	树高 Tree height (m)	干高 Trunk height (m)	冠幅 Crown breadth (m) 东西 E-W	南北 S-N	主枝数 Branch number	枝量 Shoot number	树冠体积 Crown volume (m³)	无效结果区域 Non-fruit area 体积 Volume (m³)	占总体积比 Non-fruit/whole (%)	负载量 Fruit load
DC	疏散分层形 Delayed open-central shape	6.12	0.61	6.34	8.12	6.8	5 854.93	222.67	31.40	14.10	1 150
HS	高干形 High-stem shape	6.09	1.98	7.03	7.24	3.6	3 968.41	164.21	3.53	2.15	1 120
OC	开心形 Open-center shape	6.52	0.63	8.06	7.32	3.2	2 325.14	272.79	0	0	1 720
CS	小冠半圆形 Semicircle small-canopy shape	4.56	0.43	5.51	5.06	5.4	3 593.16	90.39	1.18	1.30	1 200

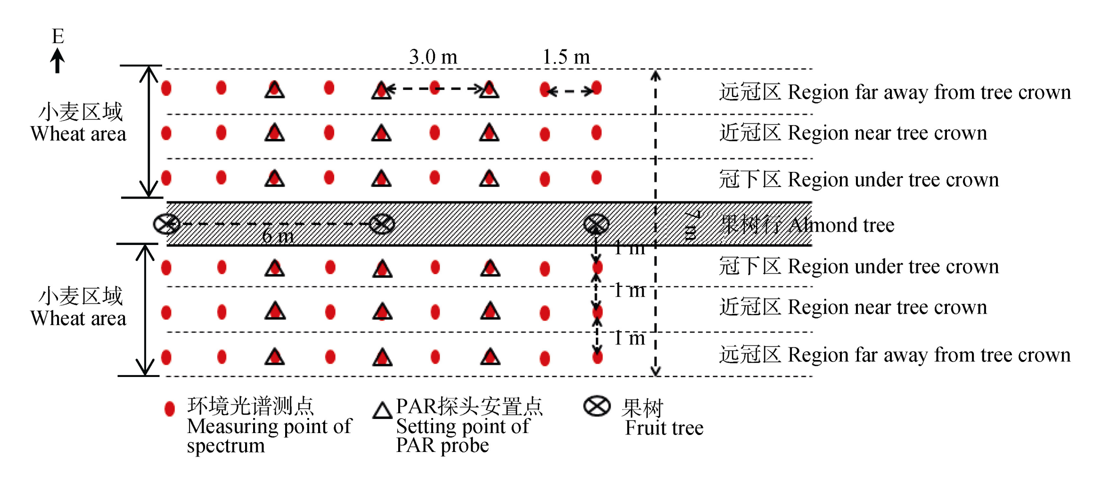


图 1　扁桃||小麦间作系统和小麦区域测点布置示意图

Fig. 1　Sketch map of almond-wheat intercropping and measuring points in wheat area

1.2　测定指标及方法

1.2.1　间作区域光谱指标测定

使用 UniSpec-SC 单通道便携式光谱测定仪(最佳感应范围: 300~1 100 nm; 分辨率: <10 nm; 精确度: <0.3 nm)对各小区间作区域光谱组成进行测定, 每个处理共设置 54 个测点, 具体测点位置的设置与分布见图 1。小麦灌浆期选择晴朗的天气, 于当地时间(东 6 区)9:00—10:00(清晨)、12:00—13:00(正午)和 15:00—16:00(下午)3 个时间段对进行测定, 以相同时段, 邻近区域大田种植测定值为对照(探头高度与其他测点保持一致), 探头高度与间作小麦植株高度保持一致, 连续测定 3 d。

1.2.2　间作区域光合有效辐射(PAR)日变化规律测定

小麦灌浆期, 使用美国 ONESET HOBO 公司生产的 U30-NRC 小型气象站中的光合有效辐射监测系统(测量范围: 0~2 500 μmol·m^{-2}·s^{-1}; 光谱范围: 400~700 nm; 精度: ±5%; 分辨率: 2.5 μmol·m^{-2}·s^{-1})对间作区域 PAR 变化进行测定, 选择晴朗的天气, 自 11:00—19:00 对 PAR 的日变化情况进行连续测定, 每 10 min 记录一次。每个处理设 18 个测点, 具体探头位置的设置与分布见图 1, 探头高度与小麦高度保持一致, 连续测定 3 d。

1.3 数据处理

对测定数据按区域进行合并统计，使用 Microsoft Excel 2010 和 SAS 数理统计软件对数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 果树树形处理对作物间作区域光质分布的影响

由图 2 和表 2 可知，扁桃||冬小麦间作模式下，不同扁桃树形对小麦间作区域光强和光质分布存在明显影响。从不同间作区域光谱分布图可以看出，与远冠区相比近冠区和冠下区 310~1 130 nm 波长的辐射强度均有不同程度的降低，其中疏散分层形处理降低幅度最大，小冠半圆形降低幅度最小，其他两个树形居中。疏散分层形树冠两侧冠下区和近冠区均较低；高干形近冠区优于东侧、西侧两个冠下区；开心形两侧冠下区间无较大差异，而近冠区较低；小冠半圆形东侧冠下区与远冠区差异较小，其他两个区域略低。

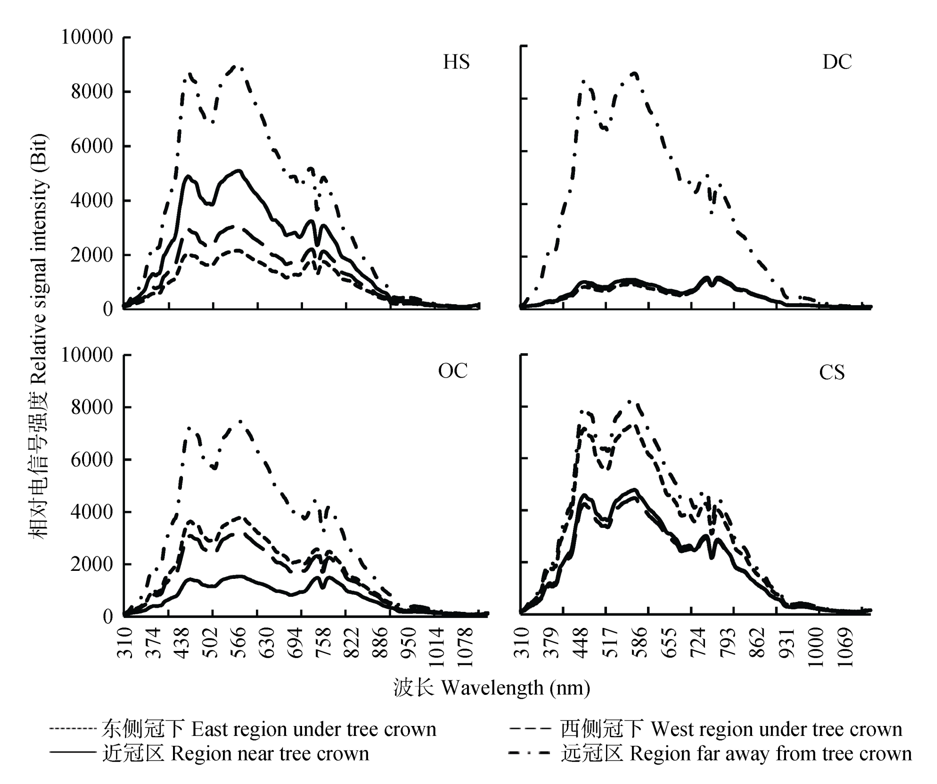


图 2 不同扁桃树形处理下扁桃||小麦间作系统中灌浆期小麦区域的光谱分布特征

Fig. 2 Spectrum distribution characteristics in wheat area at filling stage of wheat in almond-wheat intercropping system with different almond tree forms treatments

表 2 不同扁桃树形处理下扁桃||小麦间作系统中小麦灌浆期小麦区域的光质分布特征

Table 2 Spectrogram distribution characteristics in wheat areas at wheat filling stage in almond-wheat intercropping system with different almond tree forms treatments 10 000 Bit

处理 Treatment	总辐射 Total radiation (310~1 130 nm)	紫外光 UV (310~400 nm)	蓝紫光 Blue-violet light (400~510 nm)	黄绿光 Yellow and green light (510~610 nm)	红橙光 Red and orange light (610~710 nm)	近红外 Near infrared ray (710~760 nm)	远红外 Far infrared ray (760~1 130 nm)
DC	105.39±20.24Bc	4.29±0.49Bc (4.07%)	23.92±3.33Bc (22.70%)	27.45±3.83Bc (26.04%)	19.67±2.68Cc (18.67%)	9.23±1.09Bc (8.76%)	21.90±2.11Bc (20.78%)
HS	172.55±30.25ABbc	6.84±2.44ABab (3.97%)	40.65±15.99ABab (23.56%)	46.56±17.96Abab (26.98%)	33.46±12.95ABab (19.39%)	14.27±4.48ABab (8.27%)	31.39±8.28Abab (18.19%)
OC	139.84±47.42ABab	5.58±1.89ABbc (3.99%)	32.24±12.02ABbc (23.06%)	36.91±13.64ABbc (26.39%)	26.44±9.81Bbc (18.90%)	11.86±3.55ABbc (8.48%)	27.16±6.61ABbc (19.42%)
CS	210.58±91.97Aa	8.25±3.65Aa (3.92%)	50.82±24.96Aa (24.13%)	56.89±26.07Aa (27.02%)	42.12±20.23Aa (20.00%)	16.69 ±6.52Aa (7.92%)	36.31±12.82Aa (17.24%)

同列数据后不同大写字母表示 0.01 水平差异显著，不同小写字母表示 0.05 水平差异显著。下同。括号内数字为相应波段辐射占总辐射百分率。Different capital and small letters in the same column mean significant difference among treatments at $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively. The same below. The number in parentheses is the ratio the corresponding waveband in the total radiation.

由表 2 可以看出，4 个树形处理间作区域光照条件存在显著差异。疏散分层形处理各波段平均辐射强度均极显著低于小冠半圆形处理；开心形处理除总辐射外，各波段平均辐射强度均显著低于小冠半圆形。除小冠半圆形外，其他 3 个处理东西两侧冠下区和近冠区各波段辐射强度均极显著低于远冠区，

小冠形处理除总辐射外，其他各波段西侧冠下区和近冠区均显著低于远冠区区域(部分数据未列出)。不同间作区域各波段光照降低幅度不同，因此不同波段光照强度占总辐射的比例变化较为复杂，4 个树形处理冠下区和近冠域 310~400 nm(紫外)、710~760 nm (近红外)和 760~1 130 nm(远红外)3 个波段光照与远冠区相比占总辐射比例提高，其中远红光波段比例变化幅度大，400~510 nm(蓝紫光)、510~610 nm (黄绿光)和 610~710nm(红橙光)3 个波段占总辐射比例降低。

2.2 果树树形处理对间作区域 310~1 130 nm 光质消减程度的影响

由表 3 中可以看出，与自然光对照相比 4 个树形处理间作作物区域光照强度均发生不同程度的消减。通过对同一处理相同区域不同波段光质间的比较可以看出，蓝紫光、黄绿光、红橙光即光合有效辐射降低幅度较总辐射平均值高，形成辐射快速消减区域；紫外光、近红外和远红外等波段光照降低幅度较总辐射平均值低，形成辐射的惰性消减区。同一波段光照不同处理的方差分析结果表明，疏散分层形各波段光质占自然光对照比例均极显著低于小冠半圆形；开心形显著低于小冠半圆形。

2.3 果树树形处理对间作区域光质参数的影响

由表 4 可以看出，4 个树形处理不同间作作物区域光质参数间存在一定差异，部分差异达极显著水平。其中紫外/蓝紫比值在 0.175~0.250 的范围之内变动，变异系数为 17.39%，且疏散分层形处理与其他 3 个处理间存在极显著差异。红橙/蓝紫比值在 0.834~0.863 的范围之内变动，变异系数为 2.13%，疏散分层形处理与其他 3 个处理间存在极显著差异。红橙/远红外比值在 0.651~1.018 的范围之内变动，浮动范围较大，变异系数为 23.34%，疏散分层形处理与其他 3 个处理间存在极显著差异。近红光/远红光比值在 1.275~1.683 的范围之内变动，变异系数为 13.70%，方差分析结果与红橙/远红外比值一致。光合有效辐射/总辐射比值在 0.574~0.691 的范围之内变动，变异系数为 9.06%。各光质参数中红橙/远红外比值变异系数最大，对树冠冠层特征的反应最敏感。

表 3 不同扁桃树形处理下扁桃||小麦间作系统中小麦区域灌浆期各波段光质占无遮蔽自然光的百分率

Table 3 Percentages of various bands spectrum to the natural radiation at wheat filling stage of wheat areas in almond-wheat intercropping system with different almond tree forms treatments %

处理 Treatment	总辐射 Total radiation (310~1 130 nm)	紫外光 UV (310~400 nm)	蓝紫光 Blue-violet light (400~510 nm)	黄绿光 Yellow and green light (510~610 nm)	红橙光 Red and orange light (610~710 nm)	近红外 Near infrared ray (710~760 nm)	远红外 Far infrared ray (760~1 130 nm)	光合有效辐射 PAR (380~710 nm)
DC	28.76±3.41Bc	29.98±3.17Bc	26.10±3.39Bc	26.43±3.45Bc	26.76±3.41Bc	32.15±3.57Bc	37.66±3.40Bc	26.40±3.41Bc
HS	46.54±15.92ABab	48.08±16.98ABab	44.09±16.58ABab	44.58±16.41ABab	45.23±16.66ABab	49.51±14.79ABab	53.75±13.41ABab	44.57±16.53ABab
OC	37.87±12.08ABbc	39.00±12.45ABbc	35.18±12.34ABbc	35.55±12.36ABbc	35.96±12.57ABbc	41.32±11.64ABbc	46.70±10.70ABbc	35.52±12.40ABbc
CS	55.63±25.76Aa	55.71±25.17Aa	53.79±26.57Aa	54.32±26.57Aa	55.48±26.94Aa	57.67±24.03Aa	60.95±21.60Aa	55.84±26.56Aa

表 4 不同扁桃树形处理下扁桃||小麦间作系统中小麦区域灌浆期光质参数的差异

Table 4 Ratio between different bands spectrum of wheat areas at wheat filling stage in almond-wheat intercropping system with different almond tree forms treatments

处理 Treatment	紫外/蓝紫 UV/Blue-violet light	红橙/蓝紫 Red and orange light/blue-violet light	红橙/远红外 Red and orange light/far infrared ray	近红光/远红光 Near infrared ray/ far infrared ray	光合有效辐射/总辐射 PAR/Total radiation
DC	0.250±0.034Aa	0.863±0.019Aa	0.651±0.083Bc	1.275±0.111Bc	0.574±0.041Bc
HS	0.185±0.015Bbc	0.834±0.013Bb	0.938±0.192Aab	1.606±0.190Aab	0.673±0.045Aab
OC	0.200±0.021Bbc	0.835±0.011Bb	0.817±0.161ABb	1.494±0.161Ab	0.640±0.045Ab
CS	0.175±0.012Bc	0.838±0.010Bb	1.018±0.169Aa	1.683±0.135Aa	0.691±0.033Aa
变异系数 CV (%)	17.39	2.13	23.34	13.70	9.06

2.4 果树树形处理对间作区域光合有效辐射(PAR)日变化规律的影响

受太阳照射角度与树冠透光程度的影响，不同树形处理的间作作物区域 PAR 辐射日变化趋势存在较大差异(图 3)。其中疏散分层形处理小麦区域除远冠区表现为明显的单峰曲线外，其他两个近冠区和冠下区均无明显峰值，全日 10:00—19:00 范围内均处于较低水平(PAR 强度<500 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)；高干形处理东侧冠下区和远冠区 PAR 日变化呈双峰曲线峰值分别出现在 10:00 和 13:00，西侧和东侧两个近冠区域表现为单峰曲线其中西侧峰值出现在 10:00，东侧峰值出现在 13:00，西侧冠下区全日均处于较低水

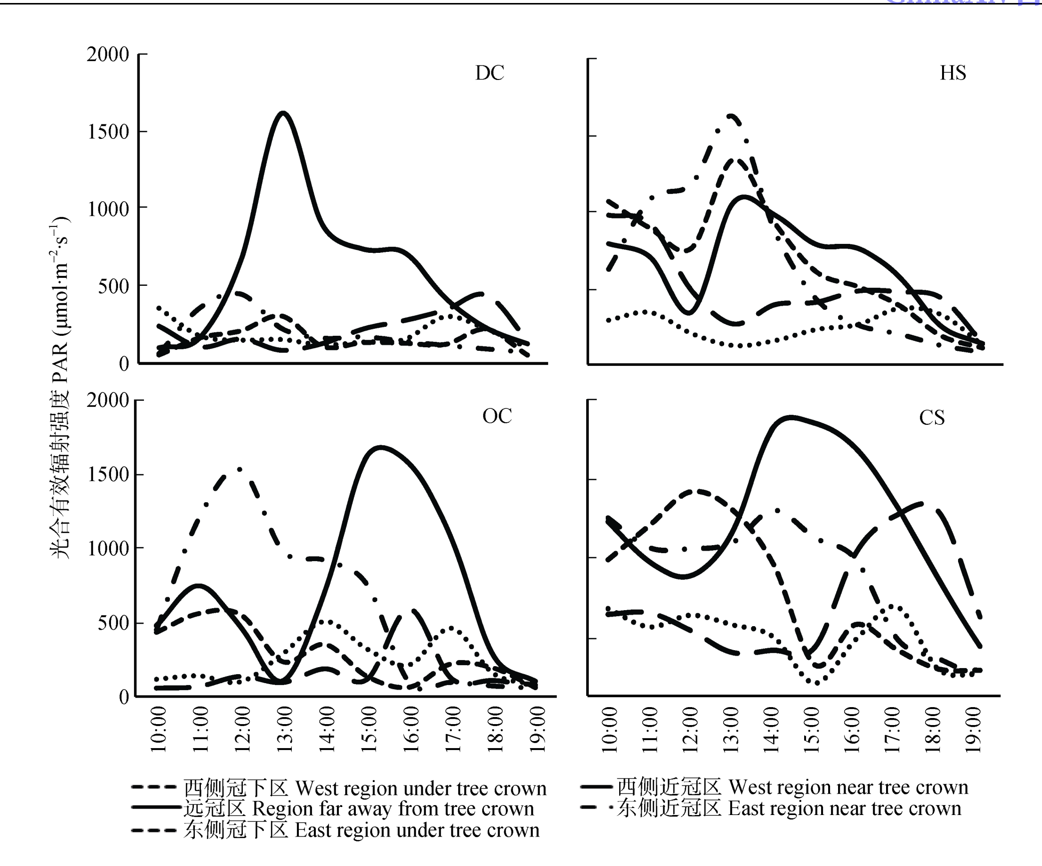


图 3　不同扁桃树形处理下扁桃小麦间作系统中 4 个扁桃树形下小麦区域小麦灌浆期光合有效辐射日变化趋势

Fig. 3　PAR daily variation trend at wheat milk filling stage of intercropping areas under 4 almond tree from treatments in almond/wheat intercropping system variation trend in different intercropping areas

平(PAR 强度<400 μmol·m^{-2}·s^{-1})，与疏散分层形相比东侧冠下和近冠区域 15:00 前光照条件得到改善；开心形处理 2 个近冠区域 PAR 日变化趋势呈单峰曲线，其他 3 个区域呈双峰曲线变化趋势，但除远冠区(峰值出现在 16:00)和东侧近冠区(峰值出现在 11:00)峰值较为显著外，其他 3 个区域峰值较低，与疏散分层形相比东侧近冠区域 16:00 之前光照条件得到改善；小冠半圆形处理两个近冠区为单峰变化趋势，其他 3 个区域呈双峰变化趋势，与其他 3 个处理相比峰值较高，持续时间也较长，与疏散分层形相比东侧冠下 15:00 之前，东侧近冠 17:00 之前，西侧近冠 15:00—19:00 光照条件得到明显改善。

3　讨论

3.1　果树树冠对间作作物区域光照辐射强度的影响

光对作物生长发育和产量形成至关重要，它除了作为一种能量物质参与光合作用外，还以触发信号的形式影响植物的生长发育[6]。光线经过透射、吸收、反射通过叶幕层，到达冠层底部后辐射强度发生不可逆转的降低[11,13−15]。本文研究结果与前人研究相符，自然光经过果树冠层到达间作物冠层，不同间作作物区域均发生不可逆转的消减，受不同树形树冠结构的影响，间作区域消减程度存在较大差异，远冠区光照强度高于冠下区和近冠区，在行向、株行距相同的情况下，小冠形处理间作区域光照强度高于其他 3 个树形，高干形和开心形次之，疏散分层形最低。各间作区域总辐射强度为自然光的 11.37%~79.97%。

树冠拦截吸收不仅对光照强度及分布产生影响，同时受叶绿素选择吸收的影响，进一步改变了透射光的光质组成。姜仲书等[10]对苹果冠层截光特性的研究发现，自然光经过果树叶片的吸收反射到树冠下层后，总辐射和各波段的绝对辐射量急剧降低，但各波段下降幅度不同，其中 UV-A、UV-B、可见光、红外线分别下降 48.16%、62.95%、65.06%和 14.74%。牛自勉等[16]发现太阳辐射透过苹果叶幕在 530~560 nm 和 672~703 nm 波长内，形成了辐射快速消减区，而在 738~746 nm 波长之间，形成了辐射消减的惰性区。李芳东等[17]发现，泡桐(*Paulownia* sp.)||小麦间作系统中，受树冠叶幕形成影响，间作区域光谱组成不断变化，灌浆期至成熟期光谱组成差异最为显著。本文研究结果与前人研究相符，入射光到达间作物冠层后，400~510 nm(蓝紫光)、510~610 nm(黄绿光)和 610~710 nm(红橙光)区域下降幅度高于相同区域总辐射平均值，310~400 nm(紫

外)、710~760 nm(近红外)和 760~1 130 nm(远红外)波段下降幅度低于总辐射平均值。

大量研究结果表明果粮间作系统中，间作作物区域光照的分布受树种、行向、株行距、树形结构特征等因素的共同影响。丁松爽等[18]人认为枣树年生长期与间作作物生育期重叠时间短，且枣树枝条稀疏，透光率较大，适宜应用于果农间作。郭佳欢等[7]、王清涛等[8]、李星等[19]运用间作巷道"饱和时空窗"度量的方法研究间作系统光分布的结果表明，间作作物饱和时空窗的持续时间受间作树种和行间距影响，且作物不同生育期饱和光合有效辐射强度不同，进一步影响间作巷道饱和时空窗的持续时间。季永华等[4]通过理论计算对苏北沿海地区林网内各遮阴带的日变化和林荫透光率进行分析，结果表明北林带胁地范围不明显，东西林带居中，南林带最严重，南北行向优于东西行向。李连国等[20]认为，间作系统中为避免交互遮阴株距不宜小于 1/2 株高。张雯等[21]研究认为在树种、行向等影响因素均已确定的情况下，对株距和行距进行调整，使其达到最佳配置模式，才能保证间作系统光照的合理分布，实现较高的经济效益。本文研究结果表明，在疏散分层形基础上通过落头的改形措施构建开心形树形结构，改形后树高、干高、冠幅无较大改变，但去除主干后枝量下降 60.28%，无效结果区域由 14%变为 0，间作作物区域平均总辐射强度可提高 32.68%；疏散分层形经过逐步提干改造后，将干高由 0.6 m 提高至 1.9 m，枝量降低 32.22%、树冠体积降低 26.25%，间作区域总辐射强度可提高 61.82%；小冠形处理与疏散分层形、开心形和高干形相比树冠体积则可降低 59.40%、66.86%和 44.95%，间作区域总光合有效辐射分别提高 99.30%、50.20%和 21.73%。

3.2　果树树冠对间作区域光质参数的影响

光强及光质组成作为信号物质，对植物的形态建成和器官发育进行调节[22–23]，植物的光形态建成基本上由吸收 R/FR 的光敏素[12]和吸收蓝光/UV-A 的隐花素控制，因此不同波段光照的组成比例对植物生长发育具有重要的意义。姜仲书等[10]发现，自然光经过苹果叶片的吸收反射到达树冠下层后，光谱组成发生变化，红光/远红光(R/FR)值显著降低。有关玉米–大豆套作的研究表明，与净作大豆冠层光环境相比，低层大豆冠层红光、蓝光、远红光及其比例关系改变[13]。本文研究结果表明，自然光透过上层果树冠层到达下层间作物冠层后，不同处理不同间作区域的光质参数均发生变化，部分区域差异达到极显著水平，其中 R/FR 值相关红橙/远红外、近红光/远红光两组比值变化幅度较大，红橙/远红外比值变化范围最广，对果树冠层结构特征的反应也最敏感，能够有效地反映出树冠遮挡对间作区域光质组成的影响。

3.3　树冠结构对间作区域光合有效辐射日变化动态的影响

光合有效辐射(PAR)是太阳辐射中波长在 400~700 nm 之间可被植物直接用于光合作用的辐射能量，与作物的生产能力密切相关。果粮间作模式下，间作区域 PAR 日变化动态受太阳运行轨迹[24]和树冠遮阴动态[25]的共同影响。在行间距固定的情况下，树冠结构(树高、冠幅、干高、有无主干、枝叶密度、枝叶分布)进一步影响间作区域 PAR 日变化趋势。本文研究结果表明，在行距 7 m 的栽植模式中，平均冠幅 5 m、树高 4.5 m 的情况下(小冠半圆形)除西侧冠下区外其他 4 个区域均能保证一定时长的较高的 PAR 强度；当冠幅大于 7 m、树高大于 6 m 的情况下(疏散分层形)两侧近冠区和冠下区 PAR 强度整日均处于较低水平；树高、冠幅不变的情况下，将干高提高至 1.9 m 后(高干形)东侧冠下和近冠区 15:00 之前 PAR 强度提高；进行落头开心处理后(开心形)东侧近冠区 16:00 之前 PAR 强度提高。

4　结论

果粮间作模式在栽植行向、株行距等因素都已确定的情况下，果树树形对作物间作区域光照强度、光照持续时间及光谱组成均有显著影响。本研究中，扁桃各树形处理的西侧冠下区光照条件最差、远冠区光照条件最优；控冠、提干、落头等整形修剪措施能够改善作物间作区域的光照条件，但措施影响程度和主要作用区域不同；各树形间作区域小麦灌浆期光照条件由高至低依次为小冠半圆形、高干形、开心形和疏散分层形；光受上层树冠拦截吸收到达作物冠层后，不同波段降低幅度不同，并最终导致光质组成比例的变化，其中红橙(610~710 nm)/远红外(760~1 130 nm)的比值对果树冠层结构特征的反应最敏感，可作为评判间作区域光质环境的指标。

参考文献　References

[1] 张玉东, 刘春惊, 陈瑞萍, 等. 南疆杏麦复合类型对间作小麦产量及其构成因素的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 179–182

Zhang Y D, Liu C J, Chen R P, et al. Study on wheat field and the wheat yield components characteristic under apricot trees-wheat interplanting patterns in southern part of Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(4): 179–182

[2] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014: 397–398
Statistics Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Xinjiang Statistical Yearbook 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014: 397–398

[3] 乔旭, 赵奇, 雷钧杰, 等. 核桃–小麦间作对小麦生长发育及产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(4): 734–738
Qiao X, Zhao Q, Lei J J, et al. Study on growth, development and yield formation of wheat under walnut-wheat intercropping system[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(4): 734–738

[4] 季永华, 张纪林, 康立新, 等. 苏北沿海地区不同模式农田林网胁地效应的研究[J]. 江苏林业科技, 1994(2): 5–9
Ji Y H, Zhang J L, Kang L X, et al. A study on the marginal effect of the different model farmland forest shelter network in the coast of Jiangsu[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 1994(2): 5–9

[5] Gebbing T, Schnyder H. Pre-anthesis reserve utilization for protein and carbohydrate synthesis in grains of wheat[J]. Plant Physiology, 1999, 121(3): 871–878

[6] Aguirre A, Rubiolo O J, Ribotta P D, et al. Effects of incident radiation and nitrogen availability on the quality parameters of triticale grains in Argentina[J]. Experimental Agriculture, 2009, 42(3): 311–322

[7] 郭佳欢, 潘存德, 冯会丽, 等. 枣麦间作系统中冬小麦的冠层光分布特征及产量研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 183–191
Guo J H, Pan C D, Feng H L, et al. Canopy light distribution and yield of winter wheat in jujube-wheat strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(2): 183–191

[8] 王清涛, 潘存德, 王世伟, 等. 与冬小麦间作条件下轮台白杏间作巷道光环境特征[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(5): 817–822
Wang Q T, Pan C D, Wang S W, et al. Light environmental characteristics in intercropping alley of *Armeniaca vulgaris* ‘Luntaibaixing’ with winter wheat[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(5): 817–822

[9] 田阳, 云雷, 毕华兴, 等. 晋西黄土区果农间作光竞争研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 288–292
Tian Y, Yun L, Bi H X, et al. Research on light competition of fruit-crop intercropping system in the loess region of west Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4): 288–292

[10] 姜仲书, 张光伦, 江国良, 等. 金冠苹果树冠内光质构成及其与果实品质的相关性[J]. 果树学报, 2008, 25(5): 625–629
Jiang Z S, Zhang G L, Jiang G L, et al. Study on light component and its correlation with fruit quality in canopy of Golden Delicious apple tree[J]. Journal of Fruit Science, 2008, 25(5): 625–629

[11] Yang F, Huang S, Gao R C, et al. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: Far-red ratio[J]. Field Crops Research, 2014, 155: 245–253

[12] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1217–1234
Xu D Q, Gao W, Ruan J. Effects of light quality on plant growth and development[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8): 1217–1234

[13] Gao Y, Duan A W, Qiu X Q, et al. Distribution and use efficiency of photosynthetically active radiation in strip intercropping of maize and soybean[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(4): 1149–1157

[14] Palmer J W. The effects of row orientation, tree height, time of year and latitude on light interception and distribution in model apple hedgerow canopies[J]. The Journal of Horticultural Science, 1989, 64(2): 137–143

[15] 杨峰, 崔亮, 黄山, 等. 不同株型玉米套作大豆生长环境动态及群体产量研究[J]. 大豆科学, 2015, 34(3): 402–407
Yang F, Cui L, Huang S, et al. Soybean growth environment and group yield in soybean relay intercropped with different leaf type maize[J]. Soybean Science, 2015, 34(3): 402–407

[16] 牛自勉, 张文和, 王建新. 苹果开心树形叶幕太阳辐射吸收规律研究[J]. 华北农学报, 2009, 24(4): 212–217
Niu Z M, Zhang W H, Wang J X. Study of solar radiation and its transmission and diffusion in the center-open system of apple[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(4): 212–217

[17] 李芳东, 傅大立, 王保平, 等. 桐麦间作系统辐射光谱成分变化规律的研究[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 109–117
Li F D, Fu D L, Wang B P, et al. A study of the spectral variations of solar radiation inside and outside the inter-crop system of *Paulownia* trees and wheat crop[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 109–117

[18] 丁松爽, 苏培玺, 严巧娣, 等. 不同间作条件下枣树的光合特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 184–189
Ding S S, Su P X, Yan Q D, et al. Photosynthetic characteristics of Chinese jujube under different intercropping conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 184–189

[19] 李星, 潘存德, 王世伟, 等. 与棉花间作条件下枣树间作巷道光环境特征[J]. 天津农业科学, 2016, 22(2): 109–113
Li X, Pan C D, Wang S W, et al. Light environmental characteristics in intercropping alley of jujube with cotton intercropping system[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(2): 109–113

[20] 李连国, 崔学明, 李晓燕, 等. 果粮间作生态系统光能分布规律的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1998, 19(3): 49–53
Li L G, Cui X M, Li X Y, et al. Study on light energy distribution law in fruit-crop planting ecosystem[J]. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal husbandry, 1998, 19(3): 49–53

[21] 张雯, 李金明, 刘翠荣, 等. 南疆果粮间作模式下扁桃不同冠形间的差异及对小麦产量和生长的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(1): 154–160
Zhang W, Li J M, Liu C R, et al. The difference of almond

crown-shapes and its influence on wheat growth and yield in the intercropping system of South Xinjiang[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(1): 154–160
[22] Valladares F, Saldaña A, Gianoli E. Costs *versus* risks: Architectural changes with changing light quantity and quality in saplings of temperate rainforest trees of different shade tolerance[J]. Austral Ecology, 2012, 37(1): 35–43
[23] Bertamini M, Muthuchelian K, Nedunchezhian N. Shade effect alters leaf pigments and photosynthetic responses in Norway spruce (*Picea abies* L.) grown under field conditions[J]. Photosynthetica, 2006, 44(2): 227–234
[24] 许华森, 毕华兴, 高路博, 等. 晋西黄土区苹果+大豆间作系统小气候及其对作物生产力的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(2): 9–15
Xu H S, Bi H X, Gao L B, et al. Microclimate and its effects on crop productivity in the *Malus pumila* and *Glycine max* intercropping systems on the Loess Plateau of West Shanxi Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(2): 9–15
[25] 乔旭, 雷钧杰, 陈兴武, 等. 核麦间作系统小气候效应及其对小麦产量的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 540–544
Qiao X, Lei J J, Chen X W, et al. Effect of microclimate in walnut-wheat intercropping system on wheat yield[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 540–544